LAS MACROALGAS MARINAS PUEDEN APORTAR COMPUESTOS DE INTERÉS PARA LA ALIMENTACIÓN DE ANIMALES MONOGÁSTRICOS

La gran disponibilidad de macroalgas hace que sean un recurso interesante en la alimentación animal. Sin embargo, su inclusión como ingrediente en el pienso ha sido bastante excepcional debido a su "pobre" perfil nutricional, caracterizado por altos niveles de agua, fibra dietética y cenizas, lo que implica un bajo contenido de energía y aminoácidos disponibles. Por esta razón, las macroalgas marinas se han utilizado tradicionalmente para alimentar rumiantes en lugares y períodos donde no hay otra alternativa, y los estudios sobre su valor nutricional se han centrado en ellos, mientras que apenas se utilizan en la fabricación de piensos para no rumiantes.

JAVIER GARCÍA[1], SUSANA CHAMORRO[2], SABELA AL-SOUFI[3], ANA PAULA LOSADA[3], NORA FORMOSO-RAFFERTY[1], JOSÉ MANUEL MIRANDA[3], CARLOS ROMERO[4], BEATRIZ HERRANZ[5], PILAR GARCÍA REBOLLAR[1], EUGENIO CEGARRA[6], MANUELA BUJÁN[7], ANTONIO MUIÑOS[7], NURIA NICODEMUS[1], MARTA LÓPEZ-ALONSO[3]

[1] *E.T.S.I. Agronómica, Alimentaria y Biosistemas, Universidad Politécnica de Madrid*
[2] *Facultad de Ciencias Biológicas, Universidad Complutense de Madrid*
[3] *Facultade de Veterinaria, Universidade de Santiago de Compostela*
[4] *Facultad de Ciencias y Artes, Universidad Católica de Ávila*
[5] *Facultad de Veterinaria, Universidad Complutense de Madrid*
[6] *De Heus Nutrición Animal*
[7] *Porto Muíños S.L.*

La recolección y el cultivo de macroalgas marinas no son actividades nuevas, ya que se utilizan en la alimentación humana, cosméticos, etc., y producen una gran cantidad de biomasa, especialmente en Asia (FAO, 2018). Hoy en día, hay una transición de la recolección de poblaciones silvestres a la acuicultura de algas para mejorar la sostenibilidad de la producción de macroalgas. En España, algunas algas todavía se recolectan, mientras que otras han comenzado a cultivarse, actividades que están reguladas legalmente en algunas Comunidades Autónomas. Se ha demostrado que el cultivo de macroalgas tiene un efecto beneficioso en el medio marino, por ejemplo, alrededor de los lechos de mejillones para contrarrestar el impacto de este cultivo (Freitas *et al.,* 2016). La abundancia de algunas macroalgas y el aumento de su uso, ya sea como alimento humano o como biorremediadores ambientales, han producido descartes o la disponibilidad de biomasa de algunas especies que no pueden comercializarse fácilmente y requieren valorización (Al-Soufi *et al.*, 2023). En Galicia hay varias macroalgas de interés porque i) ya se cultivan y la producción está aumentando (*Ulva* spp., *Gracilaria bursa-pastoris*, *Saccharina latissima*), ii) son potencialmente cultivables a corto plazo (*Solieria* spp., *Himanthalia elongata, Undaria pinnatifida)*, iii) existen descartes disponibles (*H. elongata, U. pinnatifida, Laminaria ochroleuca*) o iv) se recolectan debido a su alta abundancia (*Ulva spp., Fucus vesiculosus, Mastocarpus stellatus*) (Al-Soufi *et al.,* 2023).

La gran disponibilidad de macroalgas hace que sean un recurso interesante en la alimentación animal. Sin embargo, su inclusión como ingrediente en el pienso ha sido bastante excepcional debido a su "pobre" perfil nutricional, caracterizado por altos niveles de agua, fibra dietética y cenizas, lo que implica un bajo contenido de energía

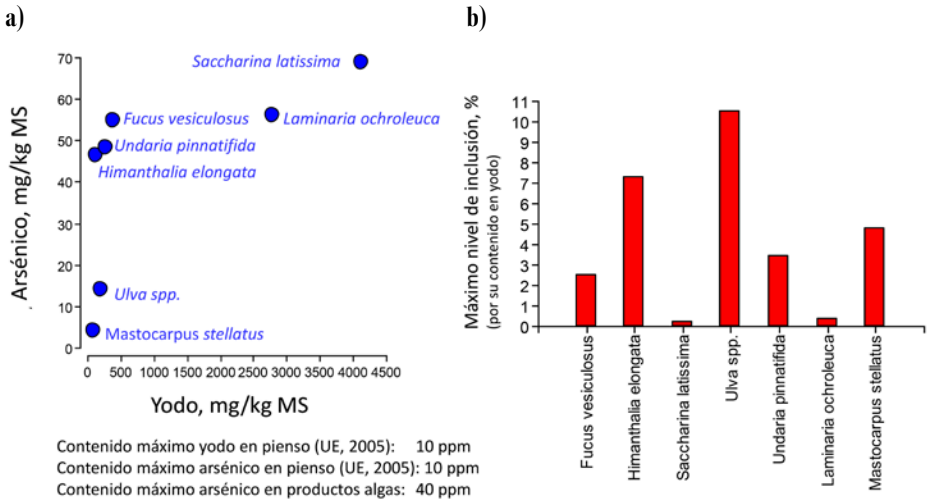

Figura 1.
a) Contenido de yodo y arsénico en maroalgas. b) Porcentaje máximo de inclusión de distintas macroalgas en piensos . Fuente: Al-Soufi *et al.* 2025.

y aminoácidos disponibles (Makkar *et al.,* 2016; Al-Soufi *et al.,* 2023). Por esta razón, las macroalgas marinas se han utilizado tradicionalmente para alimentar rumiantes en lugares y períodos donde no hay otra alternativa, y los estudios sobre su valor nutricional se han centrado en ellos (Bikker *et al.,* 2020), mientras que apenas se utilizan en la fabricación de piensos para no rumiantes. En parte, esto puede explicarse por las elevadas dosis evaluadas en distintos estudios, que pueden proporcionar un exceso de minerales y compuestos bioactivos o antinutricionales (Ford *et al.*, 2020; Coudert *et al.*, 2020; Al-Soufi *et al.*, 2025), o características sensoriales indeseables en la carne o los huevos (Carrillo *et al.*, 2008; Costa *et al.*, 2022; Al-Soufi *et al.*, 2024a). Probablemente, la primera limitación para incluir macroalgas en el pienso es su alto contenido de algunos elementos minerales. Específicamente, algunas especies tienen un contenido excesivo de yodo (como el orden Laminariales) que, a diferencia de otros contenidos minerales de las macroalgas, se absorbe fácilmente casi en su totalidad (Lopez-Santamarina *et al.*, 2023). Las necesidades de yodo para no rumiantes (cerdos, aves de corral y conejos) y la legislación de la UE sobre el contenido máximo de yodo en el pienso (EC 1334/2003), limitan la inclusión máxima de macroalgas entre un 0,1 y un 10% dependiendo de la especie y el tipo de producto: macroalgas deshidratadas o extractos (Al-Soufi *et al.*, 2025) (**Figura 1**). Además, estos autores indican que el arsénico debe controlarse, aunque los niveles de arsénico son mucho menos problemáticos que los de yodo. Por el contrario, las macroalgas también contienen macrominerales y otros minerales traza (cobalto, manganeso, hierro) que son interesantes para la alimentación del ganado. En consecuencia, el ajuste de la dosis es un factor clave para la suplementación exitosa de macroalgas.

La principal fracción orgánica en las macroalgas es la fibra dietética. Contiene un número relevante de polisacáridos complejos insolubles y solubles que son específicos de cada especie (Stiger-Pouvreau *et al.*, 2016). Desde un punto de vista general, las algas verdes contienen ulvanos, celulosa, xiloglucanos y glucuronanos, las algas pardas contienen alginato, fucoidanos, celulosa y laminarina, mientras que las algas rojas contienen agar, carragenanos, xilanos y celulosa (Holdt y Kraan, 2011; Stiger-Pouvreau *et al.*, 2016; Lopez-Santamarina *et al.*, 2020). Entre estos polisacáridos, los polisacáridos sulfatados complejos como los ulvanos (xiloramnoglucuronanos), fucoidanos (homofucanos) y galactanos sulfatados (agares, carragenanos y porfiranos) suelen extraerse. Aunque son muy poco fermentables (Bobin-Dubigeon *et al.*, 1997; Mateos-Aparicio *et al.*, 2018; Al-Soufi *et al.*, 2023a), pueden ejercer efectos positivos en la salud intestinal y la respuesta inmunitaria.

Los ensayos *in vitro* mostraron que los ulvanos inhibieron el crecimiento de *Staphylococcus aureus, Streptococcus uberis* y *Pasteurella multocida*, mientras que los polisacáridos sulfatados de *Solieria chordalis* inhibieron *Streptococcus agalactiae*, sin influencia en *Escherichia coli* enteropatógena o *Clostridium perfringens* (Berri *et al.*, 2016; Al-Soufi *et al.*, 2023; Petit *et al.*, 2024). *In vitro*, los ulvanos también desencadenaron una respuesta inmunitaria innata tanto en ensayos in vitro (Berri *et al.* 2016) como en un estudio pollos de engorde suplementados en agua de bebida con una concentración equivalente al 250 ppm en pienso (Guriec *et al.* 2018). La suplementación moderada de *Ulva* spp. (2%) en pollos de engorde mejoró la altura de las vellosidades (Cañedo-Castro *et al.*, 2019), mientras que la inclusión del 1% tuvo un efecto favorable sobre las proteínas de las uniones estrechas del intestino en conejos en crecimiento (Al-Soufi *et al.*, 2023). Por el contrario, la suplementación de 400 ppm de un concentrado de extracto de ulvano en conejos en crecimiento durante un brote de una enfermedad entérica tendió a aumentar el recuento de ooquistes fecales y redujo la altura de las vellosidades (Al-Soufi *et al.*, 2024b) (**Figura 2**). En ambos casos, la inclusión en el pienso de productos de algas no tuvo influencia sobre los parámetros de crecimiento. La combinación de extractos de polisacáridos sulfatados de diferentes macroalgas (*Ulva* spp. y la macroalga roja *S. chordalis*) en un desafío de enteritis necrótica en pollos de engorde mostró un efecto similar a la suplementación con antibióticos,

reduciendo la mortalidad y aumentando la expresión génica de las proteínas de las uniones estrechas del intestino y las citoquinas antiinflamatorias (Blue *et al.*, 2024).

Por otra parte, *S. latissima* y sus extractos ricos en laminarina (1,3-β-D-glucanos) mostraron una fermentabilidad similar a la pulpa de remolacha (Al-Soufi *et al.*, 2023) y pueden actuar como prebióticos, pero también pueden ejercer efectos positivos en la fisiología intestinal y la respuesta inmunitaria. Los experimentos *in vivo* en conejos en crecimiento, incluyendo un 1% de *S. latissima* o su extracto en el pienso, tendieron a mejorar la digestibilidad fecal de la materia seca y la proteína, lo que fue menos evidente cuando se utilizó un extracto de *Ulva* spp. (Alfonzo *et al.*, 2023). En lechones, se ha observado un efecto positivo de la inclusión de laminarina (300 ppm) en la digestibilidad fecal de la proteína y la energía, lo que podría estar relacionado con una mejor funcionalidad intestinal (Walsh *et al.*, 2013; Heim *et al.*, 2014). Sin embargo, no se observó ningún efecto significativo de los productos de macroalgas en la salud o los rendimientos reproductivos de los conejos en crecimiento (Alfonzo, 2023; Perez, 2023; Al-Soufi *et al.*, 2024b), aunque el extracto de *H. elongata* tendió a aumentar la proporción de butirato en el íleon de manera similar a la obtenida *in vitro*. Aparentemente no hubo problema con la palatabilidad del pienso, aunque sí hubo una tendencia a reducir la ingesta de pienso. La inclusión de *S. latissima* (0,5%) en el pienso de conejos en crecimiento no modificó la incidencia de mortalidad ni los principales rendimientos productivos (Al-Soufi *et al.*, 2024b). Nuevamente, hubo una tendencia a reducir la ingesta de pienso en los grupos alimentados con algas en comparación con el grupo control, sin afectar a la tasa de crecimiento. El contenido de yodo del pienso con *S. latissima* (7 ppm) no tuvo un efecto negativo en el rendimiento. Un extracto de *S. latissima* y *L. ochroleuca*, que contiene laminarina como producto principal, inhibió *in vitro* varios *E. coli* enteropatógenos, *Salmonella typhimurium enteridis y Pseudomonas aeruginosa* (Al-Soufi *et al.*, 2023).

En cuanto a la fisiología reproductiva, la inclusión de *Ulva lactuca* al 1-2% en el pienso de conejas reproductoras aumentó los niveles plasmáticos de estrógenos en un 125%, pero no se observaron efectos sobre los rendimientos reproductivos, probablemente debido al limitado tamaño de muestra (Makkar *et al.*, 2016). En otros estudios que utilizaron niveles de inclusión más altos (2-4%) observaron un efecto positivo sobre la reproducción (características del semen y prolificidad) (Okab *et al.*, 2013; Abu Hafsa *et al.*, 2021). Además, los suplementos dietéticos que contienen *Laminaria* spp., junto con ácido fenólico, ácidos hidroxicinámicos, taninos y flavonoides de extractos de plantas, afectaron positivamente el estado antioxidante de las conejas, aunque no se observó efecto alguno sobre los rendimientos reproductivos bajo buenas condiciones de cría.

Las macroalgas marinas también son una fuente de compuestos bioactivos como los polifenoles, un grupo diverso de metabolitos secundarios, bien documentados por su efecto antioxidante demostrado en numerosos estudios en humanos y animales. Los compuestos fenólicos de los organismos marinos están mucho menos estudiados que los de fuentes terrestres. Sin embargo, tanto su relevancia biológica como sus propiedades potenciales los convierten en un grupo atractivo que merece un mayor interés científico (Mateos *et al.*, 2020). El potencial anticancerígeno de los compuestos fenólicos presentes en las algas marinas ha sido exhaustivamente revisado (Erpel *et al.*, 2020; Matulja *et al.*, 2020; Besednova *et al.*, 2022). Las macroalgas marinas contienen una amplia variedad de compuestos polifenólicos, incluidos polímeros complejos de floroglucinol (florotaninos), bromofenoles, flavonoides y otros compuestos más simples; como ácidos fenolicos, que pueden ejercer efectos positivos frente al estrés oxidativo (Goya y Mateos, 2024). Al igual que ocurre en las plantas terrestres, el contenido y el tipo de compuestos polifenólicos presentes en las algas dependen de muchos factores y difieren entre algas pardas, verdes y rojas. En el caso de los florotaninos (componentes estructurales de la pared celular en las algas pardas) y sus metabolitos derivados, estudios recientes también han mostrado su potencial para regular vías moleculares críticas (Besednova *et al.*, 2022). Los florotaninos se metabolizan y absorben predominantemente en el intestino grueso (Corona *et al.*, 2016), aumentando la actividad de las enzimas antioxidantes y reduciendo la peroxidación lipídica (Erpel *et al.*, 2020).

A pesar de su prometedora bioactividad, estos compuestos pueden afectar negativamente a los parámetros productivos a ciertas dosis. Los polifenoles altamente polimerizados pueden interferir con la digestibilidad de otros nutrientes, reduciendo potencialmente la eficiencia alimentaria. Sin embargo, las

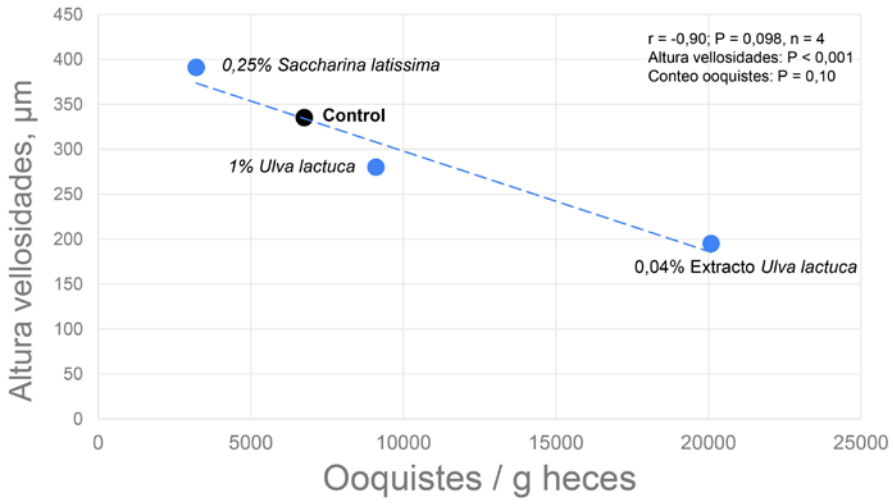

Figura 2.
Relación entre la altura de las vellosidades intestinales y el conteo fecal de ooquistes en gazapos alimentados con piensos suplementados con productos de algas. Fuente: Al-Soufi *et al.* 2024.

moléculas más polimerizadas, aunque menos digestibles, pueden exhibir una mayor actividad biológica después de ser metabolizadas y transformadas por la microbiota intestinal. En el caso particular de los polifenoles de algas marinas, los estudios *in vitro* han mostrado efectos diversos sobre la digestibilidad de la materia seca en cerdos dependiendo de la dosis empleada y del procedimiento utilizado para la extracción de las macroalgas (Kellog *et al*., 2014; Ford *et al*., 2020). Esto resalta la necesidad de una comprensión más profunda de su digestibilidad, vías metabólicas y transferencia tisular, para equilibrar sus beneficios funcionales con un impacto mínimo en la productividad. Por lo tanto, para estudiar la bioactividad, parece necesario también estudiar la biodisponibilidad y el metabolismo de los fenoles marinos. Los compuestos fenólicos de bajo peso molecular pueden ser absorbidos parcialmente al atravesar la barrera intestinal, encontrándose en la sangre como tales o como metabolitos conjugados a través de procesos como la metilación, sulfatación y glucuronidación en el hígado (Manach *et al*., 2004). Sin embargo, los polifenoles polimerizados no pueden ser absorbidos en el intestino delgado y deben ser metabolizados en el intestino grueso, donde, con la ayuda de la microbiota, se transforman en compuestos más simples (generalmente ácidos fenólicos) que pueden ser absorbidos y llegar a los tejidos para ejercer su actividad antioxidante. En este sentido, estudios recientes también han profundizado en el metabolismo y la biodisponibilidad de estos compuestos en aves, identificando metabolitos que se acumulan en el plasma y la carne, contribuyendo a explicar su potencial antioxidante y demostrando que las aves pueden metabolizar estos compuestos de manera similar a los mamíferos (Chamorro *et al*., 2019; Muñoz *et al*., 2019; Herranz *et al*., 2024). Durante el metabolismo de los polifenoles, se pueden generar metabolitos específicos que posteriormente se transfieren a los fluidos y tejidos. Esta transformación metabólica podría no solo mejorar los efectos antioxidantes de estos compuestos, sino también abrir la posibilidad de enriquecer productos derivados de animales con moléculas bioactivas.

En definitiva, las macroalgas contienen compuestos de gran interés que, utilizadas a la dosis adecuada, ejercen efectos muy positivos sobre los animales, especialmente en conejos. Sin embargo, para optimizar la salud y los resultados productivos en conejos todavía falta profundizar en cómo aportarlas (alga entera *vs*. tipo de extracto), qué cantidad y qué combinación de productos de algas.

BIBLIOGRAFÍA

Queda a disposición del lector interesado en el correo electrónico: redaccion@editorialagricola.com